بررسی اثر میزان رس کائولینیت و حرارت در پاک‌سازی خاک ماسه بادی آلوده به گازوئیل از طریق روش استخراج بخارات خاک (SVE)*

محمدرضا صبور[1] بهجت رضایی[۲] امین جعفرقلی[۳]

چکیده امروزه با توسعه‌ی استفاده از محصولات نفتی بحث افزایش آلودگی خاک و نیاز به پاک‌سازی آن از مسائل جدی و مطرح می‌باشد. علت فراوانی استفاده از روش SVE (Soil Vapor Extraction) برای پاک‌سازی خاک،آسانی کار، هزینه‌ی مناسب و راندمان خوب آن بوده است. به‌نظر می‌رسد با توجه به جوان بودن این بحث در کشورمان نیاز است تا با ابعاد مختلف آن بیش‌تر آشنا شویمو از این روش برای پاک‌سازی خاک‌های آلوده در گذشته و آینده استفاده نماییم. در این مقاله تأثیر نوع خاک و حرارتبه‌عنوانـدو پارامتر مهم در رانـدمان روش استخراج بخارات مورد بررسی قرار گرفته است. خاک مورد استفاده ماسه بادی بوده کـه بـا درصـدهای مختلـف از رس کائولینیـت مخلـوط گردید. با ساخت پایلوت و انجام آزمایش، نتایج پاک‌سازی این خاک‌ها از هیدروکربن‌های آلیفاتیک موجود در گازوئیل گـزارش شـده اسـت. نتایج به‌دست آمده بیان کننده‌ی این مطلب است که با افزایش میزان رس در خاک ماسه بادی، راندمان پاک‌سازی بـه‌شـدت کـاهش مـی‌یابـد به‌طوری‌که در حالت عدم وجود رس، راندمان پاک‌سازی بعد از ۲٤ ساعت تا ۷۸/٤٪ پیشرفت داشت. هنگامی که خـاک دارای ۲۰٪ رس بـود راندمان حذف به ۲٥/۲٤٪ رسید و در حالت٤۰٪ رس راندمان به ۲۳/۷٥٪ رسید. اعمال حرارت درحالت عدم وجود رس تأثیر محسوسـی در افزایش راندمان پاک‌سازی نداشت. در حالت وجود ۲۰٪رس، حرارت بیش‌ترین تأثیر را داشت و راندمان پاک‌سازی را به‌میزان ۲۰/٦٪ افزایش داد. در حالت وجود٤۰٪ رس تأثیر حرارت دوباره کاهش یافت و به‌میزان ۱۲/٥۷٪ رسید. در مجموع نقش بافت خاک پررنگ‌تر از اثر حرارت بود و افزایش درصد رس راندمان پاک‌سازی را کاهش داد.

واژه‌های کلیدی استخراج بخارات، پاک‌سازی خاک، رس، هیدروکربن‌های آلیفاتیک، گازوئیل، ماسه‌بادی، حرارت

Investigating the Influence of Clay &Heating in remediation of contaminated soil from Gas-Oil by Soil Vapor Extraction (SVE)

M. R. Sabour B. Rezaie A. Jafargholi

Abstract *Utilizing considerablepetroleum products, increasing soil contamination and need to its clean-up is one of serious environmental issues. Soil vapor extraction is a common and very wide used method for soil remediation because of its Easy operation, low cost and high efficiency.In this paper, influence of soil type and heating, as two important parameters in efficiency of soil vapor extraction method is examined. The used soil isblown sand, which is mixed with different percentages ofkaolinite clay. Establishing pilot and running experiments, the result of soilsremediationout of aliphatic hydrocarbons in gas-oil is reported. The results indicate thatenhancement of clay percentage leads to great reductioninclean-up efficiency.After 24 hours test running,removal efficiencyreached to 78.4%for the soil with 20% clay content, while this efficiency fell down to 23.75% for the soil with 40%of clay content. Having no clay within the soil, soil-heated vapor extractionmethod did not causenoticeable increasing in clean-up efficiency. However, heating has the most influence and increases clean-up efficiency for 20.6%with presence of 20% clay within the soil, while presence of %40 clay decreasesthe efficiency to 12.57%.*

key Words Clay, Heating, Soil Remediation, Soil Vapor Extraction Method, Gas-Oil.

*تاریخ دریافت مقاله ۹۰/۱۰/۳ و تاریخ پذیرش آن ۹۲/۱۰/۱ می‌باشد.

(۱) نویسنده‌ی مسؤول: استادیار گروه عمران و محیط‌زیست دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

(۲) کارشناس ارشد مهندسی عمران محیط‌زیست، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

(۳) کارشناس ارشد مهندسی عمران محیط‌زیست، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

مقدمه

آلودگی محیط زیست بر چرخه‌ی طبیعت اثر می‌گذارد و پیامدهای زیان‌باری برای زندگی انسان، حیوان، گیاه و بناها دارد [1]. یکی از انواع آلودگی‌های محیط زیست آلودگی خاک است. از جمله آلاینده‌های خاک، مواد نفتی و مشتقات آن‌ها است که در اثر حمل ونقل یا ذخیره‌سازی نادرست موجب آلوده شدن خاک می‌شوند [2,3].

استخراج بخارات خاک (SVE) یک روش درجا برای پاک‌سازی خاک است که با استفاده از آن می‌توان غلظت مواد فرار در محصولات نفتی که توسط قسمت‌های غیراشباع خاک جذب شده است کاهش داد [4]. در این روش با ایجاد خلأ، جریانی از هوا در شبکه‌ی خاک به‌وجود می‌آید. اینجریان از طریق گرادیان فشار منفی باعث تبخیر، جدایی مواد از خاک و تغییر فاز آلاینده از حالت مایع به گاز می‌شود و بخارات حاصل به سمت چاه‌های استخراج حرکت می‌کنند. بخارات خارج شده پس از تصفیه به اتمسفر تخلیه می‌گردند و یا مجدداً به درون خاک تزریق می‌شوند [5,6].

مؤثر بودن این تکنولوژی در کاهش قابل توجه غلظت اجزای آلی فرار (VOCs) (Volatile Organic Compound) و برخی از اجزای آلی نیمه‌فعال (SVOCs) (Semi Volatile Organic Compound) به‌خوبی به اثبات رسیده است [7]. مزیت این روش برای پاکسازی خاک نسبت به سایر روش‌ها عبارت است از: (۱) در دسترس بودن تجهیزات، (۲) نصب آسان، (۳) کم‌ترین مزاحمت برای سایر عمل‌کردهای سایت، (٤) زمان کوتاه تصفیه (معمولاً ٦ ماه تا ۲ سال)، (۵) قابلیت ترکیب آسان با سایر تکنولوژی‌های پاک‌سازی مانند تزریق هوا و در نهایت (٦) قابل رقابت بودن هزینه‌ها [7].

برخی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار در عملکرد و راندمان روش SVE عبارتند از تخلخل و نفوذپذیری (بافت خاک) ، میزان مواد آلی خاک، درصد رطوبت خاک، فشاربخار آلاینده، فراریت آلاینده، نرخ جریان هوای عبوری و دمای سیستم.

توزیع و آرایش ذرات خاک که در نفوذپذیری آن مؤثرند تأثیر زیادی در اجرای عملیات استخراج بخارات دارد [8]. هرچه نفوذپذیری خاک بیش‌تر باشد عبور جریان هوا از میان آن آسان‌تر می‌شود و راندمان روش SVE بالاتر می‌رود [9,10]. برای مثال هرچه درصد رس در خاک افزایش یابد نرخ پاک‌سازی کاهش خواهد یافت [11].

بافت خاک تأثیر زیادی در راندمان پاک‌سازیSVE دارد. این موضوع می‌تواند به چند علت باشد. نخست آن‌که ظرفیت جذب سطحی خاک‌های مختلف با هم متفاوت است. در خاک‌های ریزدانه که سطح مخصوص دانه‌های خاک به نسبت خاک‌های درشت‌دانه بیش‌تر است آلاینده به‌سختی از سطح آن جدا می‌گردد. دوم آن‌که نفوذپذیری خاک‌ها با هم تفاوت دارد. در حالتی که نفوذپذیری خاک زیاد باشد (ماسه درشت) ، جریان هوا تقریباً تمامی مسیرهای ممکن را در شبکه‌ی خاک می‌پیماید و موجب تبخیر آلاینده می‌شود. حال آن‌که در خاک ریزدانه جریان هوا تنها مسیرهای محدودی را می‌پیماید و این به علت نفوذپذیری پایین این خاک‌هاست [12,13]. در مقایسه‌ای که بین پارامترهای مؤثر بر بازدهی روش SVE صورت گرفته است، اثر بافت خاک بیش از نوع آلاینده بوده است [١٤].

یکی از روش‌های کمکی برای افزایش راندمان استخراج بخارات ایجاد حرارت است. راه‌های مختلفی برای افزایش دمای سیستم وجود دارد: (۱) تزریق هوای گرم (۲) جریان الکتریکی و (۳) امواج رادیویی.

مطابق با تحقیقات صورت گرفته افزایش دما هم باعث افزایش نرخ حذف عناصر می‌شود و هم دامنه‌ی حذف آن‌ها را گسترده‌تر می‌کند. هم‌چنین در صورتی که دمای خاک تا حدی بالا رود که فشار بخار ماده‌ی

موجـود در خـاک بـالاتر از ۷۰ کیلـو پاسـکال شـود، استخراج بخارات قسمت اعظم از آن مـاده را از خـاک پاک‌سازی خواهد کرد [15].

استفاده از حرارت در حالتی کـه خـاک آلـوده بـه NAPLهای(Non aqueous phase liquids) بـا فشـار بخار پایین‌تر باشد مؤثرتر خواهد بود. هـم‌چنـین بایـد توجه داشت در صورتی که نرخ جریان هـوای عبـوری از شـبکه‌ی خـاک ضـعیف باشـد، پروسـه‌ی گرمـایش ممکن است بخارات آلاینده را به خارج از ناحیه‌ی گرم شده بکشاند و در ناحیه‌ای از خاک که گرمایش نـدارد آلاینده دوباره چگـال شـده و در نـواحی آلـوده نشـده پخش گردد [16,17].

در روش گرمایش از طریق امواج رادیویی می‌توان دمای خاک را در کم‌تر از ٤ دقیقه و با ۸۰۰ وات تـوان به ۷۰۰ درجه سـانتی‌گـراد رسـاند. پـژوهش‌هـا نشـان می‌دهد این حرارت زیاد در مواردی که آلودگی خـاک سنگین باشد بسیار مؤثر خواهد بود. هم‌چنین مـی‌تـوان از موادی مانند فیبرکربنی برای تسهیل در تبدیل امـواج مایکروویو به انرژی حرارتـی در خـاک اسـتفاده نمـود [18].

در تمامی پـروژه‌هـای انجـام شـده در امریکـا در خلال سال‌های ۱۹۸۰ تا ۱۹۹۰، استخراج بخارات سهم عمده‌ی ٢٦ درصدی را بـه خـود اختصـاص داده بـود [19]. پژوهش‌های متعددی بـرای بررسـی پارامترهـای تأثیرگذار بر راندمان استخراج بخارات انجام شده و در حـال انجـام اسـت. از جملـه پارامترهـای اساسـی و تأثیرگذار در روش SVE بافت خاک و دمـای سیسـتم است که در این پژوهش سعی شده است تا بـا بررسـی خاک ماسه‌بادی با درصد رس‌های متفاوت، اثـر میـزان رس و حرارت در راندمان پاک‌سـازی خـاک از طریـق SVE مورد مطالعه قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

با توجه به انتخاب روش آزمایشگاهی در ایـن تحقیـق، لازم است خصوصیات کمی و کیفیِ مواد مورد استفاده در آن یعنی خـاک و آلاینـده و هـم‌چنـین مشخصـات پـایلوت آزمایشـگاهی و روش انجـام آزمـایش‌هـا تـا رسیدن به نتایج مورد نیاز معرفی گردد.

مواد

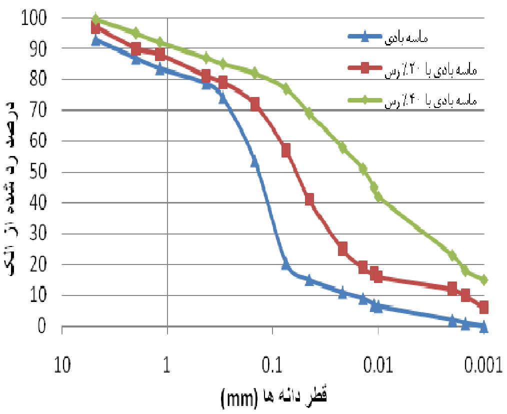
بـرای بررسـی میـزان تـأثیر وجـود خـاک ریزدانـه در پاک‌سازی خاک، ماسه بادی که در جمع‌آوری ریخت و پاش‌های نفتی اسـتفاده فراوانـی دارد بـه‌عنـوان خـاک اصلی این آزمایش‌ها مورد انتخاب قرار گرفـت. سـپس با استفاده از خاک رس کائولینیـت [20]دو نمونه‌خـاک جدید ساخته شد تـا اثـر وجـود رس در خـاک مـورد بررسی قرار گیرد:

خاک ماسه بادی با ٪۲۰ رس کائولینیت

خاک ماسه بادی با ٪٤۰ رس کائولینیت

در اختلاط رس و ماسه بادی از یک ظـرف ثابـت استفاده گردید و به‌ترتیب ۲۰ و ٤۰ درصـد حجمـی از این ظرف با رس و مابقی از ماسه‌بادی پـر شـد. خـاک رس کائولینیت مورد استفاده از کارخانه‌ی خاک چینـی ایران تهیه گردید. خاک ماسه‌بادی از شرکت ملی پخش فرآورده‌های نفتی ایران تهیه گردید.

دانه‌بندی خاک‌های مورد اسـتفاده در شـکل (۱) آمـده است.

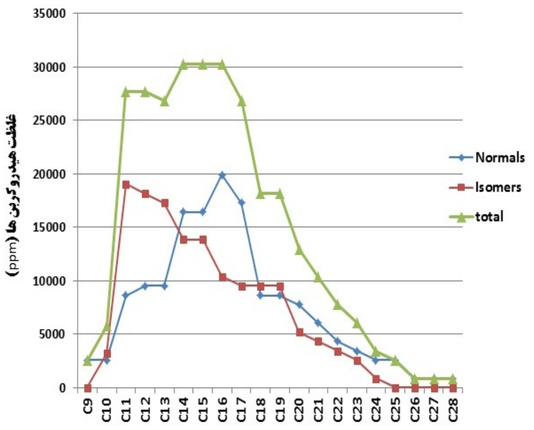


شکل ۱ دانه‌بندی خاک‌های مورد استفاده (ASTM-C146 & AASHTO-T27) (الک و هیدرومتری)

مطابق با آزمایش، درصد رطوبت(ASTM D2216) برای هر کدام از خاک‌های ماسه بادی، ماسه بادی با ۲۰٪ رس و با ۴۰٪رس به‌ترتیب برابر ۳٪، ۲/۸۵٪ و ۲/۳۲٪ و میزان مواد آلی(ASTM D2974) برای این خاک‌ها به‌ترتیب ۱/۶٪، ۱/۵۶٪ و ۱/۳۲٪ بود.

یکی از مواد نفتی پرکاربرد گازوئیل است که در این پژوهش به‌عنوان آلاینده انتخاب شده است. گازوئیل از پالایش نفت خام به‌دست می‌آید و به لحاظ مصرف در خودرو بعد از بنزین دومین جایگاه را به خود اختصاص داده است. به دلیل پایدار بودن ترکیبات آلودگی‌های نفتی، اثرات و صدمات آن به منابع انسانی، آب و محیط زیست بسیار متفاوت و پیچیده می‌باشد.

گازوئیل مورد استفاده در این پژوهش از شرکت ملی پخش‌فرآورده‌های نفتی ایران تهیه گردید. مشخصات هیدروکربن‌های موجود در این گازوئیل در شکل (۲) آمده است.



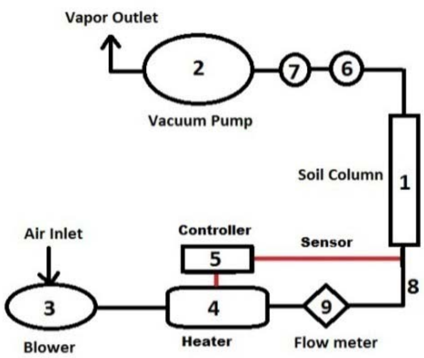
شکل ۲هیدروکربن‌های آلیفاتیک موجود در نمونه‌ی گازوئیل (کروموتوگرافی گازی)

روش انجام کار

برای انجام پاک‌سازی در مقیاس آزمایشگاهی و به روش استخراج بخارات، یک پایلوت ساخته شد.

پایلوت ساخته شده برای استخراج بخارات شامل قسمت‌های(۱) استوانه خاک، (۲) پمپ مکنده، (۳) دمنده‌ی هوا، (۴) دستگاه Heating، (۵) دستگاه کنترل حرارت، (۶) فشارسنج، (۷) دماسنج، (۸) لوله‌های هوا و (۹) فلومتر بود(شکل۳).

استوانه‌ی خاک از جنس پلکسی گلاس است و ارتفاع آن ۳۰ سانتی‌متر و قطر داخلی آن ٤ سانتی‌متر می‌باشد. دو انتهای این استوانه با درپوش‌های پیچی بسته شده و مسیر ورود و خروج هوا به استوانه بر روی این درپوش‌ها تعبیه گردیده است. درون هر کدام از این درپوش‌ها دو عدد صافی و واشرهای پلاستیکی قرار داده شده است تا مانع از خروج ذرات ریز خاک از درون استوانه به لوله‌های هوا گردد و از افت فشار سیستم جلوگیری شود. شفافیت پلکسی گلاس امکان رویت خاک را حین آزمایش فراهم می‌سازد.



شکل۳ نمای شماتیک از پایلوت استخراج بخارات

برای استخراج بخارات سیستم از پمپ مکنده‌ی Sparmax مدل TC-63/vd با دبی اسمی ۵۵ لیتر بر دقیقه و خروجی هوا به اتمسفر استفاده شد. روی این پمپ یک فشارسنج و صافی هوا نصب گردید. پمپ مذکور دارای دو خروجی هوا بود. دمنده‌ی مورد استفاده در سیستم ساخت شرکت محک و دارای قابلیت طولانی‌مدتِ کار به‌صورت پیوسته بود. در تمامی آزمایش‌ها دبی عبوری از سیستم ۰/۲۵ مترمکعب بر ساعت بوده است.

برای تنظیم و ثابت نگه داشتن درجه‌ی حرارت سیستم از دستگاه تولید حرارت به‌همراه کنترل‌کننده‌ی دیجیتال استفاده گردید. این دستگاه شامل یک المنت

تولید حرارت در محفظه‌ی گالوانیزه و هم‌چنین یک کنترل کننده‌ی دیجیتال بود که با استفاده از یک حسگر در مسیر جریان هوای ورودی به استوانه‌ی خاک، دمای هوای ورودی به ستون خاک را تغییر می‌داد و دمای مورد نظررا ثابت نگه می‌داشت. عملکرد کنترل کننده به این صورت بود که در صورت خارج شدن دمای سیستم از یک محدوده‌ی تعریف شده برای دستگاه، المنت را فعال و یا غیرفعال می‌ساخت تا دما همیشه در محدوده‌ی مورد نظر باقی بماند. دمای انتخابی برای همه‌ی آزمایش‌هایبررسی اثر رس، ۳۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و برای بررسی اثر حرارت ۴۰،۳۰ و ۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد بود.

به‌منظور کنترل شرایط سیستم آزمایش و ثابت نگاه داشتن شرایط در آزمایش‌ها، دو عدد فشارسنج یکی بر روی ستون خاک و یکی بر روی پمپ مکنده نصب گردید. در این‌صورت با بروز هرگونه ناپایداری در فشار سیستم در حین یک آزمایش و یا تفاوت فشار بین آزمایش‌های مختلف، آزمایش مربوط متوقف و تکرار می‌گردید تا نتایج نهایی تحت تأثیر قرار نگیرند. برای کنترل مجدد دمای ستون خاک یک دماسنج نیز بر روی ستون خاک نصب گردید تا دمای هوای عبوری از سیستم قبل از ستون خاک و بعد از آن ثبت و کنترل گردد. هم‌چنین یک عدد فلومتر نیز در مسیر جریان هوا قرار داده شد تا دبی عبوری جریان و تغییرات آن کنترل گردد.

پس از تهیه‌ی مواد و لوازم اولیه‌ی مورد نیاز، آماده‌سازی نمونه‌های خاک آغاز می‌گردد. در ابتدا خاک مورد نظر تهیه و در ظروف مخصوص نگهداری شد تا تغییرات رطوبت در آن قابل کنترل باشد. در حالت اول برای ساخت نمونه‌ی ماسه بادی آلوده به گازوئیل به‌میزان۵۰۰۰۰ppm، هر ۱۰۰ گرم از خاک با ۵ گرم گازوئیل به‌صورت دستی مخلوط می‌شد. در حالت دوم (و سوم) که ساخت ماسه‌بادی با ٪۲۰ (و ٪۴۰) رس مورد نیاز بود، ابتدا خاک ماسه بادی با نسبت حجمی ٪۲۰ و (٪۴۰) رس به‌صورت نمونه‌های کوچک مخلوط شد تا به مقدار مورد نیاز خاک جدید ساخته شود. سپس عملیات آلوده‌سازی مشابه قبل انجام گردید.

در هنگام ساخت نمونه‌های آلوده دقت کافی به عمل آمد که آلوده‌سازی با سرعت زیاد انجام شود تا خاک آلوده فرصت قرار گرفتن در معرض هوای بیرون را نداشته باشد. قرار گرفتن در معرض هوا ممکن استزمینه‌ی فراریت برخی از ترکیبات نمونه را فراهم سازد. هم‌چنین بعد از ساخت هر کدام از نمونه‌های ۱۰۰ گرمی، خاک آلوده درون ظرفی قرارداده شد تا مانع از قرار گرفتن خاک آلوده در معرض هوا و نور گردد و تغییری در ترکیبات آن رخ ندهد. نکته‌ی قابل توجه دیگر این بود که خاک آلوده شده می‌بایست حداقل ۲٤ ساعت درون ظرف نگهداری باقی می‌ماند تا مواد موجود در خاک و فازهای مختلف آن‌ها به حالت تعادل برسند.

برای شروع آزمایش، ابتدا خاک آلوده در سه مرحله درون استوانه‌ی آزمایش ریخته شد و در هر مرحله با ۵ ضربه (به‌منظور یکسان‌سازی تمامی نمونه‌ها) کوبیده گردید. سپس درپوش استوانه بسته شد و استوانه بر روی پایه‌ی عمودی خود قرار گرفت و لوله‌های دمش و مکش به ابتدا و انتهای آن متصل گردید. سپس دمای مورد نظر برای آزمایش انتخاب و هم‌زمان پمپ مکنده، دمنده‌ی هوا و سیستم کنترل کننده‌ی حرارت روشن گردیدند. با شروع آزمایش فشار و دبی هوا قرائت و در فواصل زمانی مشخص کنترل می‌شد. زمان انتخابی برای آزمایش‌ها ۸، ۱٦ و ۲٤ ساعت بود. با اعمال روش SVEو گذشت زمان، خاک پاک‌سازی می‌شد و غلظت هیدروکربن‌های درون آن خاک کاهش می‌یافت. بعد از ۸، ۱٦ و۲٤ ساعت، نمونه‌برداری از قسمتی مشخص از استوانه‌ی خاک (در ارتفاع ۱۰ سانتی‌متری از پایین استوانه) انجام گردید. نمونه‌ها در ظروفی مخصوص نگهداری شد و بعد از

آن برای تعیین غلظت هیدروکربن‌های آلیفاتیک قبل و بعد از اِعمال استخراج بخارات، آزمایش کروموتوگرافی گازی (GC) بر روی آن‌ها انجام گردید.

برای انجام کروموتوگرافی گازی بر روی هر کدام از نمونه‌ها، حدود ۲ گرم از هر کدام از نمونه‌ها به روش استاندارد استخراج شد و مطابق با روش کروموتوگرافی گازی مورد آزمایش قرار گرفت [۲۱]. دستگاه کروموتوگرام مدل Magnetic 8430 مجهز به آشکارساز یونش شعله‌ای بود. ستون جداسازی از نوع بسته‌ای با طول ۳متر و قطر ۰/۳۲ میلی‌متر و دمای ستون و آشکارساز ۲۳۰ درجه سانتی‌گرادبود. گازهای تولید شعله، هوا(270cm3/min) و هیدروژن (30cm3/min) و گاز حامل، نیتروژن بود.

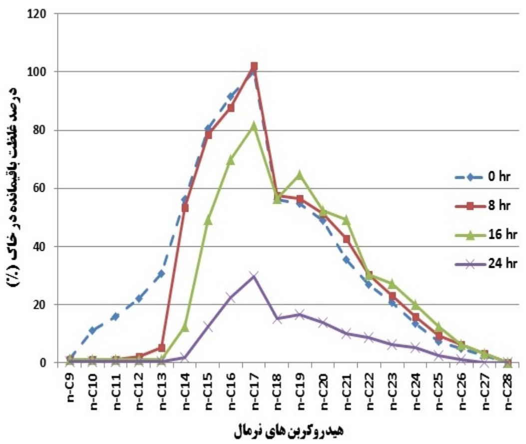
نتایج و بحث

در این بخش نتایج حاصل از آزمایش کروموتوگرافی گازی بر روی نمونه‌های اولیه‌یآلوده و نمونه‌های گرفته شده بعد از ۸، ۱۶ و ۲۴ ساعت از گذشت پاک‌سازی در سه گروه خاک بیان شده است: (۱) ماسه‌بادی، (۲) ماسه بادی با ٪۲۰ حجمی رس کائولینیت و (۳) ماسه‌بادی با ٪۴۰ حجمی رس کائولینیت. در آخر راندمان حذف و روند پاک‌سازی هیدروکربن‌ها در سه خاک و در دماهای ۳۰، ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد تحت بررسی و مقایسه قرار گرفته است.

ماسه‌بادی

برش‌های هیدروکربنی آلیفاتیک قابل تشخیص در خاک آلوده به گازوئیل شامل ۲۰ هیدروکربن C-9 تا C-28 بود. روند حذف هر کدام از هیدروکربن‌های نرمال از ماسه‌بادیبه‌صورت مجزا و در یک نمودار در شکل (۴) آمده است.

راندمان حذف آلاینده‌ها در ۸ ساعت ابتدایی ٪۷، در ۸ ساعت دوم ٪۱۳ و در ۸ ساعت پایانی ٪۵۸ بود. بیش‌ترین میزان پاک‌سازی در فاصله‌ی زمانی ۱۶ تا ۲۴ ساعت انجام گرفت. به عبارت دیگر در صورتی که پاک‌سازی در ۸ ساعت پایانی مطابق روند ساعات قبل انجام می‌گرفت راندمان حذف به ٪۲۰ می‌رسید حال آن‌که راندمان حذف در ۸ ساعت پایانی ۳ برابر روند مورد انتظار انجام گرفت. در نهایت راندمان پاک‌سازی بعد از ۲۴ ساعت تا ٪۷۸/٤ پیشرفت داشت.



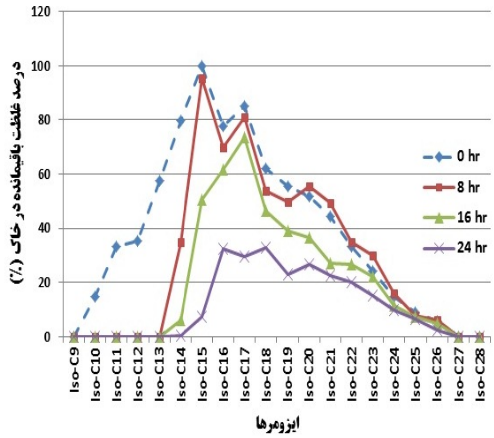
شکل ٤پاک‌سازی هیدروکربن‌های نرمال از ماسه‌بادی(در شروع آزمایش درصد غلظت هیدروکربن‌ها نسبت به هیدروکربنی که بیش‌ترین غلظت را داراست سنجیده شده است)

همان‌طور که در شکل قابل تشخیص است عمده‌ی هیدروکربن‌های سبک (C-9 تا C-13) با راندمانی بالادر همان ۸ ساعت اول پاک‌سازی شدند، بنابراین به‌نظر می‌رسد زمان عملکرد مناسب برای پاک‌سازی آن‌ها ۸ ساعت باشد. برخی از هیدروکربن‌های سنگین در ۱۶ ساعت اول دارای روندی افزایشی بودند و بعد از آن پاک‌سازی شدند. به نظر می‌رسد با توجه به تمایل شکست مولکول‌های هیدروکربنی سنگین به مولکول‌های سبک‌تر و رسیدن به حالت پایدار،علت این افزایش غلظت در هیدروکربن‌های سنگین، تبدیلات صورت گرفته هیدروکربن‌ها به هم، به‌خصوص تبدیل ایزومرها به هیدروکربن‌های نرمال باشد [22,23]. راندمان حذف برای هیدروکربن‌های C-9 تا C-28 به‌ترتیب برابر با ۹۷، ۹۷، ۹۸، ۹۹ ، ۹۹، ۹۷، ۸٤، ۷۳، ۸۰، ۷۳، ۷۰، ۷۲،

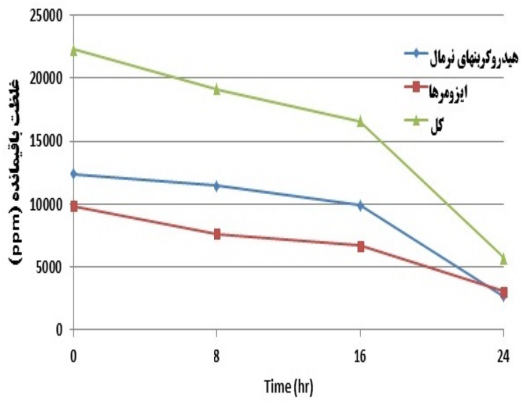
۷۲، ٦۹، ۷۰، ٦۳، ٦٦، ۸۱، ۱۰۰ و ۱۰۰ درصد بود.

شکل (۵) نشان‌دهنده‌ی تغییرات هر کدام از ایزومرهای هیدروکربنی موجود در خاک ماسه‌بادی آلوده به گازوئیل با گذشت زمان می‌باشد.

در صورت مقایسه‌ی بین روند حذف هیدروکربن‌های نرمال، ایزومرها و کل هیدروکربن‌ها که از مجموع این دو گروه تشکیل شده است شکل(٦) به‌دست می‌آید.



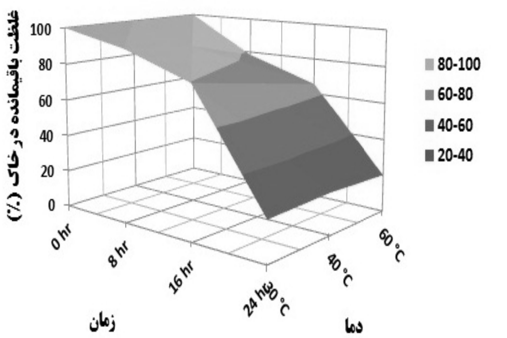
شکل ۵ پاکسازی ایزومرها از ماسه بادی (در شروع آزمایش درصد غلظت هیدروکربن‌ها نسبت به هیدروکربنی که بیش‌ترین غلظت را داراست سنجیده شده است)



شکل ٦ پاکسازی ماسه بادی از هیدروکربن‌های نرمال و ایزومرها

مطابق شکل، تغییرات کلی هیدروکربن‌های نرمال مشابه ایزومرها بود و طبیعتاً روند پاکسازی خاک از کل هیدروکربن‌ها(مجموع نرمال و ایزومر) نیز،از روند مشابه هیدروکربن‌های نرمال و ایزومرها در حذفتبعیتمی‌نمود. تنها تفاوت موجود، سرعت بیش‌تر حذف ایزومرها در ۸ ساعت ابتدایی نسبت به حذف هیدروکربن‌های نرمال مشابه در همان مدت بود. به طوری‌که راندمان حذف ایزومرها در پایان ۸ ساعت ۱٤ درصد بیش‌تر از هیدروکربن‌های نرمال آن‌ها بود. این در حالی است که در این زمان غلظت برخی از هیدروکربن‌های نرمال سنگین افزایش یافت. این موضوع می‌تواند دلیلی بر تبدیل ایزومرها به هیدروکربن‌های نرمال و افزایش غلظت آن‌ها باشد.

با تنظیم دمای هوای ورودی به ستون خاک در حالات ٤۰ و ٦۰ درجه سانتی‌گراد و اعمال استخراج بخارات، روند حذف مجموع هیدروکربن‌های آلیفاتیک در پایان پاک‌سازی مطابق نمودار شکل (۷) بود.



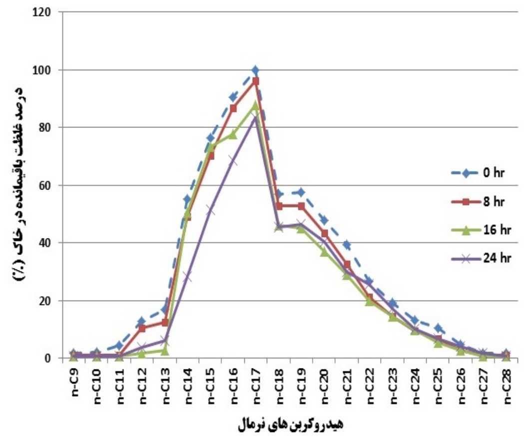
شکل ۷ پاک‌سازی مجموع هیدروکربن‌های نرمال در دماهای مختلف از ماسه‌بادی

درصد غلظت هیدروکربن‌های باقی‌مانده در ماسه‌بادی در پایان ٢٤ ساعت و در دماهای ۳۰، ٤۰ و ٦۰ درجه سانتی‌گراد به‌ترتیب برابر با ٢١/٥٦، ٢٢/٣٥ و ٢٠/٢١ درصد بود. نکته‌ی جالب توجه این‌جا است که به‌نظر می‌رسد در این حالت دمای آزمایش تأثیر محسوسی در افزایش راندمان پاک‌سازی نداشته است.

ماسه بادی با ۲۰٪ رس

در این حالت روند حذف هر کدام از هیدروکربن‌ها به صورت مجزا و در یک نمودار، مطابق شکل (۸) گردید.

در این میزان اختلاط ماسه بادی با رس،راندمان حذف در ۸ ساعت اول ۱۰٪، در ۸ ساعت دوم ۹٪ و در ۸ ساعت آخر ٦٪ بوده است. در مجموع با وجود ۲۰٪ رس در ماسه‌بادی، راندمان حذف در این حالت نسبت به ماسه‌بادی به‌میزان ٥۳/١٦٪ کاهش یافت و به ۲٥/۲٤٪ رسید.



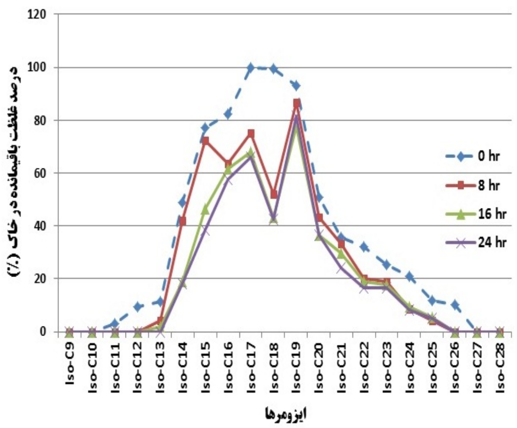
شکل ۸ پاک‌سازی هیدروکربن‌های نرمال از ماسه بادی با ۲۰٪ رس (در شروع آزمایش درصد غلظت هیدروکربن‌ها نسبت به هیدروکربنی که بیش‌ترین غلظت را دارا است سنجیده شده است)

عمده‌ی پاک‌سازی هیدروکربن‌های سنگین C-18تا C-28 و هم‌چنین هیدورکربن‌های سبک C-9 تا C-13 در ١٦ ساعت اول به‌وقوع پیوست (زمان عملکرد مناسب) . پاک‌سازی هیدروکربن‌های C-14 تا C-18 در شکل بیان‌کننده‌ی این موضوع است که بیش‌ترین میزان پاک‌سازی برای آن‌ها در ۸ ساعت انتهایی به‌وقوع پیوسته است. راندمان حذف برای هیدروکربن‌های C-9 تا C-28به‌ترتیب برابر با ٥٠ ، ٦٠ ، ۸١ ، ٧٠ ، ٦٤ ، ٤٦ ، ۳١ ، ۲۲ ، ١٧ ، ۲٠ ، ۲١ ، ۲١ ، ۲٦ ، ۲۳ ، ۲٤ ، ۲۳ ، ٤۸ ، ٤۲ ، ٤٥ و ٥٠ درصد بود.

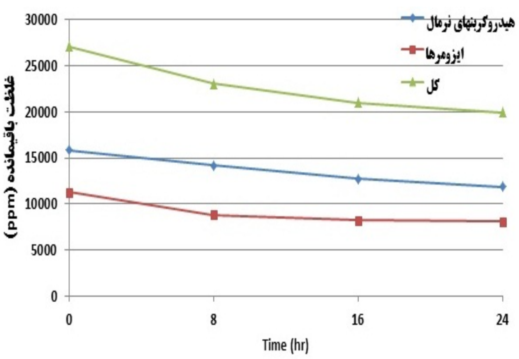
شکل (۹) نشان دهنده‌ی تغییرات هر کدام از ایزومرهای هیدروکربنی در حالت ماسه‌بادی با ۲۰٪ رس با گذشت زمان می‌باشد.

در صورت مقایسه‌ی بین روند حذف هیدروکربن‌های نرمال، ایزومرها و کل هیدروکربن‌ها که از مجموع این دو گروه تشکیل شده است شکل (١٠) به دست آمد.

در این حالت نیز سرعت حذف ایزومرها در ۸ ساعت ابتدایی نسبت به حذف هیدروکربن‌های نرمال مشابه در همان مد بیش‌تر بود. به‌طوری‌که راندمان حذف ایزومرها در پایان ۸ ساعت ١۲درصد بیش‌تر از هیدروکربن‌های نرمال آن‌ها بود.

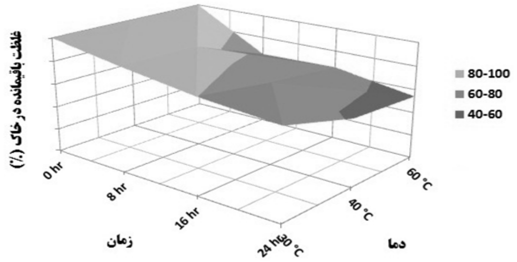


شکل ۹پاک‌سازی ایزومرها از ماسه بادی با ۲۰٪ رس(در شروع آزمایش درصد غلظت هیدروکربن‌ها نسبت به هیدروکربنی که بیش‌ترین غلظت را داراست سنجیده شده است)



شکل ١٠پاک‌سازی ماسه بادی با ۲۰٪ رسازهیدروکربن-هاینرمالوایزومرها

با تنظیم دمای هوای ورودی به ستون خاک در حالات ۴۰ و ۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و اعمال استخراج بخارات، روند حذف مجموع هیدروکربن‌های آلیفاتیک در پایان پاک‌سازی مطابق نمودار شکل (۱۱) مشاهده گردید.

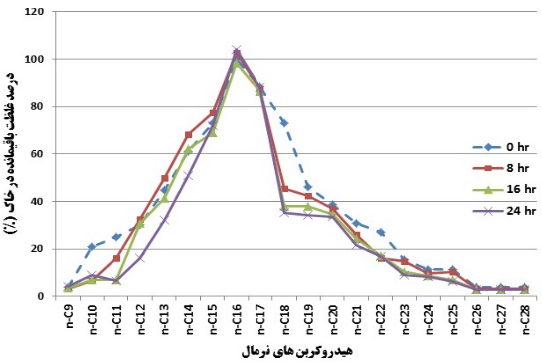


شکل ۱۱ پاک‌سازی مجموع هیدروکربن‌های نرمال در دماهای مختلف از ماسه‌بادی با ۲۰٪رس

درصد غلظت هیدروکربن‌های باقیمانده در ماسه‌بادی با ۲۰٪ رس در پایان ۲۴ ساعت و در دماهای ۳۰، ۴۰ و ۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به‌ترتیب برابر با ۷۴/۷۶، ۵۷/۴۶ و ۵۴/۱۶ درصد بود. به‌نظر می‌رسد در حالت وجود ۲۰٪رس، اثر وجود حرارت در خلال پاک‌سازی به‌خوبی خود را نشان داده و خاک در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به‌میزان ۲۰/۶ ٪ بیش‌تر پاک‌سازی شده است. نکته‌ی قابل توجه دیگر اختلاف کم ۳/۳ درصدی میان راندمان حذف در دماهای ۴۰ و۶۰ درجه سانتی‌گراد است.

ماسه‌بادی با ۴۰٪ رس

در این حالت روند حذف هر کدام از هیدروکربن‌ها به‌صورت مجزا و در یک نمودار، مطابق شکل(۱۲) بود. با افزایش درصد رس تا ٪۴۰ درصد، در مقایسه با حالت قبل، پاک‌سازی در ۸ ساعت ابتدایی دچار اختلال شد و در این مدت خاک تنها ۲٪ پاک‌سازی گردید. در ساعت‌های بعدی پاک‌سازی مشابه حالت ۲۰٪ رس و با سرعت کم‌تری انجام شد. در این حالت راندمان حذف نسبت به حالت۲۰٪ رس، به‌میزان ٪۱/۴۹ کاهش یافت و به٪ ۲۳/۷۵ رسید.



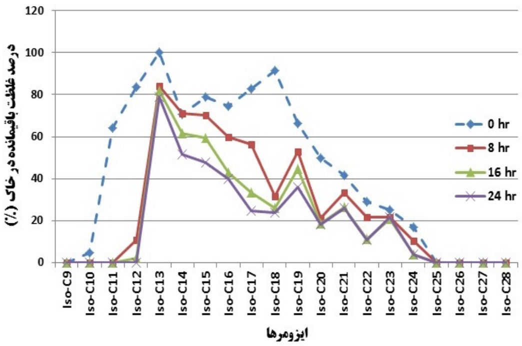
شکل ۱۲پاک‌سازی هیدروکربن‌های نرمال از ماسه بادی با۴۰٪رس (در شروع آزمایش درصد غلظت هیدروکربن‌ها نسبت به هیدروکربنی که بیش‌ترین غلظت را داراست سنجیده شده است)

روند کاهش راندمان نشان‌دهنده‌ی این مطلب است که به‌نظر می‌رسد مجاری اصلی عبور جریان هوا در خاک ماسه‌بادی، در حالت وجود ٪۲۰ رس از ریزدانه پرشده و از این درصد به بعد افزایش میزان رس، راندمان حذف را به‌آرامی کاهش داده است. تا قبل از پر شدن مجاری اصلی جریان هوا از ریزدانه، هرگونه تغییر در میزان رس اثر شدیدی بر راندمان پاک‌سازی دارد اما از مرحله‌ای به بعد با افزودن رس پاک‌سازی خاک به‌کندی تحت تأثیر قرار می‌گیرد.

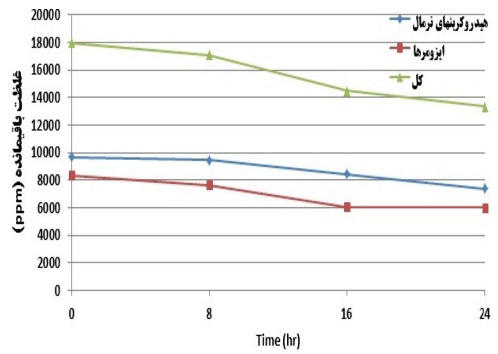
شکل (۱۳) نشان دهنده‌ی تغییرات هر کدام از ایزومرهای هیدروکربنی در حالت ماسه‌بادی با ۴۰٪ رس با گذشت زمان می‌باشد.

در صورت مقایسه‌ی بین روند حذف هیدروکربن‌های نرمال، ایزومرها و کل هیدروکربن‌ها که از مجموع این دو گروه تشکیل شده است، شکل(۱۴) به‌دست می‌آید.

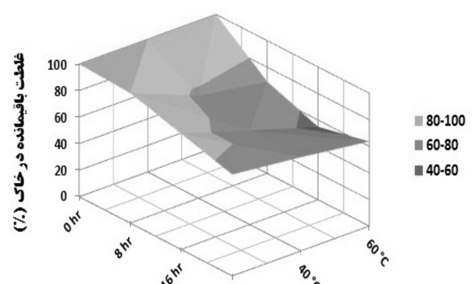
با تنظیم دمای هوای ورودی به ستون خاک در حالات ۴۰ و ۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و اعمال استخراج بخارات، حذف مجموع هیدروکربن‌های آلیفاتیک در پایان پاک‌سازی روندی مطابق نمودار شکل (۱۵) را نشان داد.



شکل ۱۳پاک‌سازی ایزومرها ازماسه بادی با۴۰٪ رس (در شروع آزمایش درصد غلظت هیدروکربن‌ها نسبت به هیدروکربنی که بیش‌ترین غلظت را داراست سنجیده شده است)



شکل ۱۴پاک‌سازی ماسه بادی با۴۰٪ رسازهیدروکربن-هاینرمالوایزومرها



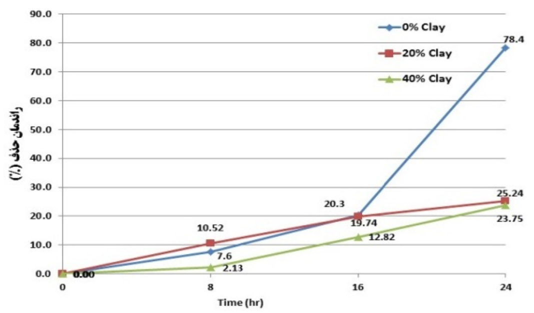
شکل ۱۵پاک‌سازی مجموع هیدروکربن‌های نرمال در دماهای مختلف از ماسه بادی با ۴۰٪رس

درصد غلظت هیدروکربن‌های باقی‌مانده در ماسه‌بادی با ۴۰٪ رس در پایان ۲۴ ساعت و در دماهای ۳۰، ۴۰ و ۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به‌ترتیب برابر با ۷۶/۲۵، ۷۰/۵۳و ۶۳/۶۸ درصد بود. در این حالت اثر وجود حرارت در خلال پاک‌سازی کم‌تر شد و اختلاف پاک‌سازی خاک در دماهای ۳۰ و ۶۰ درجه‌ی سانتی‌گرادبه‌میزان ۱۲/۵۷ ٪ بود. نکته‌ی قابل توجه دیگر افزایش اختلاف میان راندمان حذف در دماهای ۴۰ و۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و رسیدن به ۶/۸۵ درصد است.

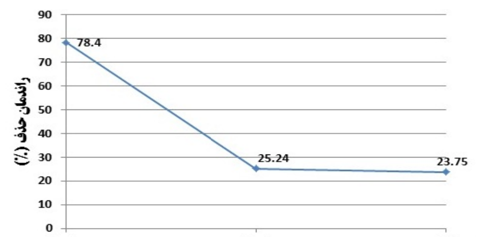
مقایسه‌ی سه خاک

با مقایسه‌ی راندمان پاک‌سازی کل هیدروکربن‌های خاک در سه حالت ماسه‌بادی، ماسه‌بادی با ۲۰٪ رس و ماسه‌بادی با ۴۰٪ رس و در دمای ۳۰درجه‌ی سانتی‌گراد نمودار شکل (۱۶) به‌دست می‌آید.

با توجه به نتایج به‌دست آمده، همان‌طور که در شکل (۱۷) نمایان است، تغییرات راندمان حذف با مقادیر مختلف رس،روندی لگاریتمی را دارا بود.



شکل ۱۶ مقایسه راندمان پاک‌سازی در سه خاک



شکل ۱۷ لگاریتمی بودن راندمان حذف با افزایش رس

نتیجه‌گیری

استخراج بخارات خاک به‌عنوان ابزاری مؤثر در پاک‌سازی خاک‌های غیر اشباع آلوده شده با VOCs شناخته می‌شود. در این مقاله راندمان پاک‌سازی روشSVEدردرصدهای مختلف رس موجود در ماسه‌بادی و هم‌چنین در دماهای متفاوت بررسی شد

که منجر به نتایج ذیل گردید:

(۱) در حالت عدم وجود رس، راندمان پاک‌سازی بعد از ۲۴ ساعت تا ٪۷۸/٤ پیشرفت داشت. هنگامی که خاک دارای ٪۲۰رس بود راندمان حذف به‌میزان ٪۵۳/۱٦ کاهش یافت و به ٪۲۵/۲٤ رسید. با افزایش درصد رس تا ٪٤۰ درصد، راندمان حذف به‌میزان ٪۱/٤۹ کاهش یافت و به٪ ۲۳/۷۵ رسید.

(۲) با تقسیم‌بندی هیدروکربن‌های قابل شناسایی C-9 تا C-28 به سه گروهِ هیدروکربن‌های سبک(C-9 تا C-11) ، هیدروکربن‌های متوسط (C-12 تا C-16) و هیدروکربن‌های سنگین (C-17تا C-28) نتایج زیر به‌دست آمد:

۲-۱- در حالت عدم وجود رس غلظت هیدروکربن‌های سنگین پس از ۸ ساعت افزایش یافت واز غلظت سایر هیدروکربن‌ها کاسته شد. اما در مجموع میزان کاهش غلظت هیدروکربن‌ها بسیار بیش‌تر از افزایش غلظت‌ها در اثر تبدیلات هیدروکربن‌ها به یکدیگر بود. در این حالت در پایان ۲٤ ساعت خاک به‌میزان قابل توجهی پاک‌سازی شد. مطابق با شواهد موجود علت این افزایش غلظت در هیدروکربن‌های سنگین، تبدیلات صورت گرفته‌ی هیدروکربن‌ها به هم، به‌خصوص تبدیل ایزومرها به هیدروکربن‌های نرمال بود. هم‌چنین با توجه به پاک‌سازی سریع خاک از هیدروکربن‌های سبک، زمان عملکرد مناسب SVEبرای پاک‌سازی هیدروکربن‌های سبک در این حالت ۸ ساعت بود.

۲-۲- در حالت وجود ٪۲۰ رس تمامی هیدروکربن‌ها به‌میزانی متوسط پاک‌سازی شدند. به‌گونه‌ای که راندمان حذف هیدروکربن‌ها در ۸ ساعت ابتدایی نسبت به حالت عدم وجود رس که در آن هیدروکربن‌های سنگین در حال تبدیل به یکدیگر بودند در مجموع بیش‌تر بود. در این حالت نیز میزان پاک‌سازی برای هیدروکربن‌های سبک بیش‌تر از سایر هیدروکربن‌ها بوده است. در این حالت به‌نظر می‌رسد زمان عملکرد مناسب SVEبرای پاک‌سازی هیدروکربن‌های سنگین ۱٦ ساعت می‌باشد و بعد از این زمان عملاً پاک‌سازی این هیدروکربن‌ها متوقف می‌گردد.

۲-۳- در حالت وجود ٪٤۰ رس روند پاک‌سازی برای هیدروکربن‌های سبک نسبت به بقیه‌ی هیدروکربن‌ها با سرعت بیش‌تری انجام گرفت. هیدروکربن‌های متوسط در ۸ ساعت ابتدایی استخراج بخارات به‌دلیل تبدیلات هیدروکربنی، مقداری افزایش داشتند و بعد از آن تا پایان ۲٤ ساعت روندی کاهشی پیش گرفتند. به‌طوریکه در پایان ۲٤ ساعت نسبت به شروع کار پاک‌سازی شدند. روند پاک‌سازی در هیدروکربن‌های سنگین به‌صورتی ملایم و با سرعتی پایین انجام گرفت.

(۳) نتیجه‌ی جالب توجه دیگر که از مقایسه‌ی پاک‌سازی هیدروکربن‌های سبک، متوسط و سنگین در سه حالت فوق به‌دست آمد این است که با افزوده شدن درصد رس در خاک ماسه‌بادی، روند تبدیلات هیدروکربنی به یکدیگر از هیدروکربن‌های سنگین به هیدروکربن‌های با وزن متوسط انتقال یافت.

(٤) روند حذف ایزومرهای هیدروکربنی در هر سه حالت خاک موجود، نشان‌دهنده‌ی این مطلب است که پاک‌سازی ایزومرها در ۸ ساعت ابتدایی با سرعتی بیش‌تر نسبت به هیدروکربن‌های نرمال مشابه‌صورت گرفته است (برای حالت عدم وجود رس ٪۱٤ بیش‌تر و برای حالت ٪۲۰ رس به‌میزان ٪۱۲ بیش‌تر) و این در حالی است که در این ۸ ساعت غلظت برخی از هیدروکربن‌های نرمالِ سنگین افزایش یافت و این موضوع تأییدی بر تبدیل ایزومرها و شکسته شدن شاخه‌های آن‌ها به هیدروکربن‌های نرمال و در نتیجه افزایش غلظت

آن‌ها در ۸ ساعت ابتدایی عملکرد پاک‌سازی می‌باشد.

(۵) روند حذف هیدروکربن‌های آلیفاتیک با اعمال حرارت در زمان پاک‌سازی، نشان‌دهنده‌ی این مطلب است که:

۵-۱- در حالت ماسه‌بادی، تغییر دما اثر محسوسی در روند پاک‌سازی و راندمان آن نداشت و پاک‌سازی در هر سه دما با سرعتی بالا و به‌میزان تقریباً یکسان انجام گرفت. در این حالت به نظر می‌رسد پارامتر بافت خاک نقش اصلی را در راندمان پاک‌سازی ایفا کرده است.

۵-۲- با افزایش درصد رس به‌میزان ۲۰٪، اثر حرارت به‌خوبی خود را نشان داد و خاک‌در دمای ٦۰ درجه سانتی‌گراد و در پایان ۲٤ ساعت به‌میزان ۲۰/٦ درصد بیش‌تر از دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد پاک‌سازی شد. در این حالت به‌علت وجود ۲۰٪ رس، پاک‌سازی کلی خاک به‌میزان قابل توجهی کاهش یافت اما اثر حرارت نقشی تعیین‌کننده را داشت. البته در این حالت پاک‌سازی در دماهای ٤۰ و ٦۰ درجه‌ی سانتی‌گراد اختلاف چندانی با هم نداشت.

۵-۳- در حالت ماسه‌بادی با ٤۰٪ رس اثر حرارت نسبت به حالت قبلی کم‌تر شد و خاک در دمای ٦۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و در پایان ۲٤ ساعت به‌میزان ۱۲/۵۷ درصد بیش‌تر از دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد پاک‌سازی گردید. به‌نظر می‌رسد با افزایش درصد رس از ۲۰ به ٤۰ درصد و با پررنگ‌تر شدن پارامتر بافت خاک دوباره از اثر حرارت کاسته شده است . نکته‌ی قابل توجه دیگر بیش‌تر شدن تفاوت میان پاک‌سازی در دو حالت ٤۰ و ٦۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به حالت قبلی است.

در صورت مقایسه‌ی میان پارامترهای مؤثر در راندمان روش استخراج بخارات که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفتند مشخص می‌شود که در هر سه حالت پارامتر بافت خاک با توجه به سهم بیش‌تر در تغییر راندمان پاک‌سازی، نقش تعیین کننده‌تری را نسبت به حرارت در پاک‌سازی به روش استخراج بخارات ایفا می‌کند.

مراجع

1. Riser-Roberts, Eve. "Remediation of petroleum contaminated soils: Biological, physical and chemical process", s. l. Lewis publisher, (1998) .
2. U. S Environmental Protection Agency (EPA) , Adopted from: http://www. epa. gov/swerust1/pubs/ tum_ch13. pdf , (2002)
3. J. S. Thornton, et al. "Removal of gasoline vapor from aquifers by forced venting", Hazardous Material Spills Conference Proceedings Prevention, Behavior, Control and Cleanup of Spills and Waste Sites. pp. 279–285. (1984) .
4. U. S Environmental Protection Agency (EPA) , Technology innovation and Field services division, Adopted from: http://clu-in. org/techfocus/. Hazardous Waste Clean-Up Information,(CLU-IN)
5. F. I. Khan, T. Husain, R. Hejazi,"An owerview and analysis of site remediation technologies", *Int. J. of Environmental. Management*, 71, pp. 95-122, (2004)
6. Suthersan, Ed. Suthan S. "Soil Vapor Extraction Remediation Engineering: design concepts", Boca Raton: CRC Press LLC, (1999) .
7. U. S Environmental Protection Agency (EPA) , "Soil vapor extraction, treatment technologies for site cleanup". (Oct. 1994) .

8. Manoel M. M. Nobre, Rosane C. M. Nobre,"Soil vapor extraction of chlorinated solvents at an industrial site in Brazil", Departamento de Geociˆencias, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL, Brazil. . *Journal of hazardous materials*, s. l. : Elsevier.
9. U. Frank, et al. "Remediation of low permeability subsurface formations by fracturing enhancement of soil vapor extraction", *Int. J. of Hazardous Materials*, 40, pp. 191–201, (1995)
10. J. T. Albergaria, et al. "Remediation efficiency of vapor extraction of sandy soils contaminated with cyclohexane: influence of air flow rate water andnatural organic matter content", *Int. J. of Environmental pollution*, 143, pp. 146-152, (2006)
11. P. Fine, B. Yaron,"Outdoor experiments on enhanced volatilization by venting of kerosene component from soil", *Int. J. of contaminant hydrology*,12(4) , pp. 35-374, (April 1993)
12. Qin Chuan-yu, et al. "Study of influencing factors on removal of chlorobenzene from unsaturated zone by soil vapor extraction", *Int. J. of Hazardous Materials*, 176, pp. 294-299, (2010)
13. José Tomas Albergaria, Maria da Conceicao, M. Alvim-Ferraz, Cristina Delerue-Matos,"Soil vapor extraction in sandy soils: Influence of airflow rate", Porto, Portugal: Elsevier, (2008)
۱٤. رضایی، بهجت و صبور، محمدرضا، "بررسی کارایی روش استخراج بخارات از خاک در پاکسازی خاک‌های آلوده به مواد نفتی"، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، تهران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، (۱۳۸۹) .
15. Poppendieck, D. G. , Loehr,R. C. , Webster, M. T. ,"Predicting hydrocarbon removal from thermally enhanced soil vapor extraction systems", *Int. J. of Hazardous Materials*, B69 ,pp. 81–93, (1999)
16. Webb, S. W. , Phelan, J. M, "Effect of soil layering on NAPL removal behavior in soil-heated vapor extraction", *Int. J. of Contaminant Hydrology*, 27 ,pp. 285-308, (1997)
17. Fleming, D. ,"Electrical Resistance Heating for Rapid Remediation of DNAPL", Thermal Remediation Services, Inc. , (April 2003)
18. Dawei, L. , Yaobin, Z. , Xie, Q. , Yazhi, Z. "Microwave thermal remediation of crude oil contaminated soil enhanced by carbon fiber", *Int. J. of Environmental Sciences*, 21, pp. 1290–1295, (2009)
19. Zhou ,Q. X. , Song, Y. F. "Remediation of contaminated soils principles and methods", China: Science Press, (2004).
20. "Definition of clay and clay mineral", *Journal report of the AIPEA nomenclature and CMS nomenclature committees*, Clays and Clay Minerals, pp: 255–256, (1995).
۲۱. مک نایر، الف. ج. ، بونلی، ه. م. ، ترجمه ی کمالی زاد، ع. ، "مبانی کروماتوگرافی گازی"، چاپ اول، مرکز نشر دانشگاهی، تهران، (۱۳٦۷) .
22. Eugege, R., Weiner,P. h. D. , "Application of Environmental Chemistry", London: Lewis, CRC Press, (2000)
23. Stumm,W. ,"Chemistry of the Solid–Water Interface. Processes at the Mineral–Water and Particle–Water Interface in Natural Systems", New York: John Wiley & Sons Inc. , pp. 448,(1992)